NEURONAL INFORMATION PROCESSING

**From Biological Data to
Modelling and Applications**

SERIES IN MATHEMATICAL BIOLOGY AND MEDICINE

Series Editors: **P. M. Auger and R. V. Jean**

Published

- Vol. 1: Stochastic Models of Tumor Latency and their Biostatistical Applications
A. Yu Yakovlev and A. D. Tsodikov
- Vol. 2: Volterra-Hamilton Models in the Ecology and Evolution of Colonial Organisms
P. L. Antonelli and R. H. Bradbury
- Vol. 4: Symmetry in Plants
Ed. by R. V. Jean and D. Barabé
- Vol. 5: Computational Medicine, Public Health and Biotechnology: Building a Man in the Machine — Proceedings of the First World Congress
Vols. 1 & 3 — ed. by M. Witten
Vol. 2 — ed. by D. Joan and M. Witten
- Vol. 6: Advances in Mathematical Population Dynamics — Molecules, Cells and Man
Proceedings of the 4th International Conference on Mathematical Population Dynamics
Ed. by O. Arino, D. Axelrod and M. Kimmel

Forthcoming

- Vol. 3: The Hierarchical Genome and Differentiation Waves:
Novel Unification of Development, Genetics and Evolution
R. Gordon

Series in
**Mathematical Biology
and Medicine**
Vol. 7

NEURONAL INFORMATION PROCESSING

From Biological Data to Modelling and Applications

Cargèse, France 30 June – 12 July 1997

Editors

G. Burdet

P. Combe

O. Parodi

*Centre de Physique Théorique
CNRS-Luminy, France*

World Scientific

Singapore • New Jersey • London • Hong Kong

Published by

World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

P O Box 128, Farrer Road, Singapore 912805

USA office: Suite 1B, 1060 Main Street, River Edge, NJ 07661

UK office: 57 Shelton Street, Covent Garden, London WC2H 9HE

British Library Cataloguing-in-Publication Data

A catalogue record for this book is available from the British Library.

NEURONAL INFORMATION PROCESSING
From Biological Data to Modelling and Applications
Series in Mathematical Biology and Medicine, Vol. 7

Copyright © 1999 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

For photocopying of material in this volume, please pay a copying fee through the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA. In this case permission to photocopy is not required from the publisher.

ISBN 981-02-3826-6

Printed in Singapore.

**TRAITEMENT NEURONAL
DE L'INFORMATION**
*des données biologiques à la
modélisation et aux applications*

Le présent document a été établi en exécution du contrat N° 96A0182 passé par la Direction de la Recherche et de la Technologie - Direction Scientifique - section soutien à la recherche.

This page is intentionally left blank

FOREWORD

For the last ten years, statistical mechanics and dynamics of neuronal automata have been extensively studied. Most of the work was based on classical modelling of neurons. Recent developments in Neurosciences have, however, considerably modified our knowledge of both the operating modes of neurons and the information processing in the cortex.

Multi-unit recordings have allowed precise temporal correlations to be detected, within temporal windows of the order of a millisecond. In the same time, oscillations corresponding to a quasi-periodic spike-firing, synchronized over several visual cortical areas, have been observed with anaesthetized cats and with monkeys. Last but not least, recent work on the neuronal operating modes have emphasized the role played by the dendritic arborization.

These developments have deeply modified our ideas on how information is coded by neurons. The coding scheme seems now to rely rather on precise spatio-temporal patterns than on spike rates, at the cortical level at least. This leads us to consider, for information processing, new models which would proceed, e.g., from a synchronous detection of correlated spike firing, and would therefore be particularly robust against noise. Such models might lead to original technical applications for information processing and control.

Further developments in this field may be of major importance for our understanding of the basic mechanism of perception and cognition. They may also may lead to new concepts in applications directed towards artificial perception and pattern recognition. Up to now, artificial systems for pattern recognition are far to reach the standards of human vision. Systems based on a temporal coding by spikes may now be expected to bring major improvements in this field.

The aim of the school was to bring to students and people engaged in both applied and basic research a high level teaching in every involved branch (Neurosciences, Physics, Mathematics, Information and Control Theory) and to encourage further exchanges. Four lectures of ninety minutes have been daily given for ten days and have been completed by locally organized poster sessions.

The school was organized as a Cargèse Summer School from 1997 June 30 to July 12, at the *Institut d'Études Scientifiques de Cargèse*, in Corsica. The institute is a joint unit (UMS 820) of *Centre National de la Recherche Scientifique*, *Université de Corte* and *Université de Nice-Sophia-Antipolis*. It is our pleasure to express our gratitude to the three institutions for their hospitality, to Elisabeth Dubois-Violette, Director of the Institute, for her constant and friendly help, and to Annette Touchant, Secretary of the Institute, as well as to the whole Institute staff, for the quality of the reception and for their heartily welcome, which was for a good part in the spirit and the success of the school.

The school was, for a large part, supported by *Formation Permanente du Centre National de la Recherche Scientifique*. This support was decisive at a time when it was not clear whether we should be able to hold the school or not. It was our hope that the school might be useful to a large number of CNRS staff and scientists, and it is our regret that so few were able to come. All French young students came from CNRS institutes, and we hope that the knowledge they brought back from Cargèse will be of some help for them and for their colleagues in their future work.

We are greatly indebted to *Direction Scientifique du Département Sciences pour l'Ingénieur du Centre National de la Recherche Scientifique* who spontaneously decided to support the school.

The support of *Direction des Recherches et Études Techniques - Direction Générale de l'Armement* of the French *Ministère de la Défense* was very important for us. Let its director find here the expression of our gratitude.

Last, but not least, it is a great pleasure for us to acknowledge *Collectivité Territoriale Corse*, its President and its *Service de l'Enseignement et de la Recherche* for their help and support. We are sure to interpretate the general feeling in telling how splendid we have found Corsica, and how friendly, Corsicans. The magic island has also contributed for a large part to the spirit and success of the school.

Let us also thank every lecturer for the quality of their lectures and for their participation to the School. We hoped we should be able to publish every lecture, and we regret that some of the lecturers had not the opportunity to send us their manuscripts. We are greatly indebted to the lecturers who have sent theirs, and we hope that, even partial, these Proceedings will be of some use to those who attended the School, as well as to those who did not.

Financial support and good lectures are an essential, but not sufficient, condition for success. The spirit of the school was brought up by the participation of everyone to discussions and activities. Let us, therefore, thank every student for his or her participation. The poster session was a great moment, and we wish that it has induced some collaborations. Our hope is that the

School has opened new perspectives and resulted in new interdisciplinary and international cooperation.

Finally the editors would like to thank the many people who made the institute and volume possible. Of especially direct help to ourselves were Jean-Bruno Erismann, Denis Patrat, Michèle Rossignol and Françoise Smagghe from the Centre de Physique Théorique de Marseille.

View from the *Institut d'Études Scientifiques de Cargèse*

AVANT-PROPOS

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses études ont porté sur la mécanique statistique et la dynamique d'automates neuronaux, basées le plus souvent sur une modélisation relativement ancienne du neurone. Mais les développements récents en Neurosciences ont considérablement modifié nos connaissances, à la fois sur le neurone et sur le traitement de l'information dans le cortex.

Les techniques d'enregistrement multi-électrodes ont permis de détecter des corrélations temporelles très précises dans des fenêtres de l'ordre de la milliseconde. En même temps des oscillations, correspondant à des émissions quasi-périodiques de potentiels d'action synchronisées à travers tout le cortex visuel, ont été observées chez des chats anesthésiés et chez des singes. Parallèlement, des travaux portant sur le fonctionnement du neurone ont souligné le rôle important joué par l'arborisation dendritique, rôle complètement passé sous silence dans les modèles classiques d'automates neuronaux.

Ces développements ont donné un essor considérable à des études, tant théoriques qu'expérimentales, faisant intervenir un codage par des configurations spatio-temporelles précises. On est ainsi amené à envisager de nouveaux modèles de traitement de l'information, basés, par exemple, sur la détection synchrone de signaux corrélés, et qui pourraient être particulièrement robustes vis-à-vis du bruit. Ces modèles pourraient conduire à des applications technologiques originales en matière de traitement de l'information et de contrôle.

L'approfondissement de ces thèmes peut être essentiel pour notre compréhension des mécanismes de base de la perception et de la cognition. Il peut aussi conduire à de nouveaux concepts dans les applications concernant la perception artificielle et la reconnaissance des formes. Jusqu'à présent les systèmes artificiels de reconnaissance des formes sont encore loin des possibilités de la vision humaine. On peut maintenant espérer que les systèmes basés sur le codage temporel par les spikes vont apporter une avancée significative dans cette direction.

Le but de cette école était d'apporter aux étudiants et aux chercheurs, tant fondamentaux qu'appliqués, un enseignement de pointe couvrant, dans ce domaine, l'ensemble des disciplines concernées (Neurosciences, Physique, Mathématiques, Théories de l'Information et du Contrôle), et de favoriser des coopérations interdisciplinaires et internationales.

Chaque jour, et ceci pendant dix jours, quatre cours de quatre-vingt-dix minutes ont été dispensés, complétés par des sessions d'affiches, le tout dans le cadre d'une école d'été organisée du 30 Juin au 12 Juillet 1997 à l'Institut d'Études Scientifiques de Cargèse, en Corse. Cet institut est une unité mixte (UMS 820) du Centre National de la Recherche Scientifique, de l'Université de Corte et de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis. Il nous est agréable d'exprimer notre gratitude aux trois institutions pour leur hospitalité, à Elisabeth Dubois-Violette, Directeur de l'Institut, pour son aide constante et amicale, et à Annette Touchant, Secrétaire de l'Institut, ainsi qu'à tout le personnel de l'Institut, pour la qualité et la chaleur de leur accueil qui a joué un grand rôle dans le climat et le succès de l'Ecole.

L'Ecole a été en grande partie subventionnée par la Formation Permanente du Centre National de la Recherche Scientifique. Ce soutien a été décisif pour nous encourager à poursuivre notre projet. Nous espérions la participation de nombreux chercheurs CNRS, et regrettons qu'elle ait été si faible. Mais tous les jeunes étudiants français provenaient d'unités CNRS, nous espérons que les connaissances qu'ils ont acquises à Cargèse seront profitables pour eux et leurs collègues dans leurs travaux futurs.

Nous sommes très reconnaissants à la Direction Scientifique du Département Sciences pour l'Ingénieur du Centre National de la Recherche Scientifique qui a spontanément décidé de soutenir financièrement l'Ecole.

La contribution de la Direction des Recherches et Études Techniques - Direction Générale de l'Armement du Ministère de la Défense français a été très importante pour nous, que son Directeur trouve ici l'expression de notre gratitude.

Finalement il nous est très agréable de remercier la Collectivité Territoriale Corse, son Président et son Service de l'Enseignement et de la Recherche pour son aide et son soutien financier. Nous sommes sûrs de nous faire les interprètes de l'ensemble des participants en disant combien nous avons trouvé la Corse splendide et les Corses amicaux. L'île magique a ainsi contribué en grande partie à l'esprit et à la réussite de l'Ecole.

Nous remercions tous nos collègues pour leur participation et la qualité de leurs cours. Nous espérions publier l'ensemble de ceux-ci et regrettons que certains manuscrits ne nous soient pas parvenus. Nous sommes très reconnaissants aux auteurs qui nous ont fait parvenir leur contribution et espérons que cette édition, même partielle, sera utile aux participants de l'Ecole et aux autres.

Soutien financier et bons cours sont essentiels mais pas suffisants pour assurer la réussite; c'est la participation de chacun aux discussions et activités qui a créé une bonne ambiance, nous remercions chaque étudiant pour sa con-

tribution. L'exposition de leurs travaux par voie d'affiches a été un grand moment et a permis d'amorcer des collaborations fructueuses.

Notre souhait est que l'Ecole ait ouvert des perspectives et engendré de nouvelles collaborations interdisciplinaires et internationales.

Pour finir nous remercions les nombreuses personnes qui ont rendu possible l'organisation de cette manifestation et la publication des comptes-rendus, en particulier Jean-Bruno Erismann, Denis Patrat, Michèle Rossignol et Françoise Smaghe du Centre de Physique Théorique de Marseille.

Guy Burdet Phillipe Combe Olivier Parodi
Marseille, 1998.

PARTICIPANTS

Francesca Acerra
Groupe de Développement
Neurocognitif
C.R.N.C. - C.N.R.S.
31, Chemin J. Aiguier
13402 MARSEILLE CEDEX 20
acerra@lnf.cnrs-mrs.fr

Masaharu Adachi
Laboratory for Artificial
Brain Systems, FRP
The Institute of Physical and
Chemical Research(RIKEN)
2-1 Hirosawa, Wako-shi
Saitama 351-01
Japan
adachi@zoo.riken.go.jp

Ad. Aertsen
Department of Neurobiology
and Biophysics
Institute Biology III
Schänzlestrasse 1
D 79104 Freiburg
Allemagne
aertsen@biologie.uni-freiburg.de

Rocio Aguilar-Chongtay
20/7 Dalgety Avenue
Edinburgh EH7 5UG
Scotland, UK
rocio@dai.ed.ac.uk

Joern Anemüller
Carl-von-Ossietzky-Universität
Oldenburg
Dept. of Physics
Medical Physics Group
D - 26111 Oldenburg
Germany
ane@medi.physik.uni-oldenburg.de

Omer Berat Artrun
Institute for Brain and Neural
Systems
Department of Physics,
Box 1843
Brown University
Providence RI 02912
USA
artun@cns.brown.edu

Alexander Asteroth
Institut fuer Informatik I
Universität Bonn
Roemerstr. 164
53117 Bonn
Germany
aster@informatik.uni-bonn.de

Thierry Ballain
LABORATOIRE TIMC
CNRS UMR 5525
UFR de Médecine
Université Joseph Fourier
38706 LA TRONCHE
Thierry.Ballain@imag.fr

Annette Bastian
CRNC - CNRS
31, ch. Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
bastian@lnf.cnrs-mrs.fr

Sander Bohte
The Netherlands Ophthalmic
Research Institute
P.O.Box 12141
1100 AC Amsterdam
The Netherlands
smbohte@phys.uva.nl

Catherine Bourdet
Service de psychiatrie
Hopital Albert Chenevier (AP-HP)
94000 CRETEIL
bourdet@ext.jussieu.fr

Guy Burdet
CPT
CNRS-Luminy case 907
13288 Marseille CEDEX 9
burdet@cpt.univ-mrs.fr

Boris Burle
CRNC - CNRS
31, ch. Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
time@lnf.cnrs-mrs.fr

Philippe Combe
CPT
CNRS-Luminy case 907
13288 Marseille CEDEX 9
combe@cpt.univ-mrs.fr

Jordi Cosp-Villela
Universitat Politècnica de
Catalunya
Dept. Enginyeria Electronica,
Edif. C4
c/Gran Capita s/n
08034 Barcelona
Spain
jcosp@eel.upc.es

Emmanuel Dauce
ONERA-CERT
2, avenue Edouard Belin
31055 Toulouse CEDEX
dauce@cert.fr

Jacques Demongeot
TIMC-Imag
Faculté de Médecine de Grenoble
38700 La Tronche
Jacques.Demongeot@imag.fr

Carolyn Drake
Laboratoire de Psychologie
Expérimentale
28 rue Serpente
75006 Paris
drake@idf.ext.jussieu.fr

Gérard Dreyfus
Laboratoire d'Électronique
ESPCI
10, rue Vauquelin
F 75005 Paris
Gerard.Dreyfus@espci.fr

Denis Fize
Laboratoire Cerveau et
Cognition
(Cerco)
133 route de Narbonne
31000 Toulouse
fize@cerco.ups-tlse.fr

Guillaume Fumanal
Neurosciences et Systemes
Sensoriels
(Physiologie Neurosensorielle)
Universite Claude Bernard
Lyon 1
69622 Villeurbanne CEDEX
fumanal@neurosens.univ-lyon1.fr

Sarah Gingell
Centre for Cognitive Science
University of Edinburgh
2, Buccleuch Place
Edinburgh, EH8 9LW
Scotland, U.K.
sarah@cogsci.ed.ac.uk

Olivier Gallet
ETIS-ENSEA URA 2235
6 avenue du Ponceau
95014 Cergy Cedex
gallet@ensea.fr

Jan Smit Gerard
Turfmarkt 88a
2801 HB Gouda
Hollande
gerards@bart.nl

Franck Grammont
CRNC - CNRS
31, ch. Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
cortex@lnf.cnrs-mrs.fr

Jeanny Hérault
Laboratoire TIRF
INPG
46 Av. Félix Viallet
38031 Grenoble
herault@tirf.inpg.fr

Alix Herrmann
Institute of Physiology
Bugnon 7
CH-1005 Lausanne
Suisse
alix@iphysiolhp1.unil.ch

John Hertz
Nordita
Blegdamsvej 17
DK-2100 Copenhagen
Denmark
hertz@norsg2.nordita.dk

André Holley
Physiologie Neurosensorielle
Universite Claude Bernard Lyon 1
F 69622 Villeurbanne CEDEX
holley@neurosens.univ-lyon1.fr

Ramon Huerta
Institute for Nonlinear Science
University of California at San Diego
La Jolla, CA 92093
USA
huerta@routh.ucsd.edu

Norbert Jankowski
 Department of Computer Methods
 Nicholas Copernicus University
 ul. Grudziadzka 5
 87-100 Torun
 Poland
 norbert@phys.uni.torun.pl

Bertrand Jouve
 Laboratoire Cerveau et
 Cognition
 (Cerco)
 133 route de Narbonne
 31000 Toulouse
 jouve@cerco.ups-tlse.fr

Christian Kurrer
 Centre de Physique Theorique
 Ecole Polytechnique
 91128 Palaiseau Cedex
 kurrer@orphaee.polytechnique.fr

Abderrahim Labbi
 Centre Universitaire
 d'Informatique
 Universite de Geneve
 24, Rue du General Dufour
 1211 Geneve 4
 Suisse
 labbi@cui.unige.ch

Michel Leseure
 Manufacturing Systems
 Management Unit
 Department of Mechanical
 Engineering
 The University of Sheffield
 Mappin Street
 Sheffield, S1 3JD
 England
 m.leseure@sheffield.ac.uk

Remy Lestienne
 Institut des Neurosciences
 9 quai St Bernard
 F-75005 Paris
 Remy.Lestienne@snv.jussieu.fr

Christoph von der Malsburg
 Institut fuer Neuroinformatik,
 ND 03/34
 Ruhr Universitaet Bochum
 D - 44780 Bochum
 Germany
 malsburg@neuroinformatik.
 ruhr-uni-bochum.de

Morgan Mangeas
 Laboratoire SAMOS
 Universite PARIS I
 90, rue de TOLBIAC
 75634 Paris CEDEX 13
 Morgan.Mangeas@der.edfgdf.fr

Ruggero Milanese
 Departement d'Informatique
 Universite de Geneve
 24, rue General-Dufour
 1211 Geneve 4
 Suisse
 Ruggero.Milanese@cui.unige.ch

Eric Mousset
 Univ. of Bern
 IAM Neural Comput.Group
 Neubrckstrasse 10
 3012 Bern Switzerland
 mousset@iam.uribe.ch

Jean-Pierre Nadal
ENS Département de Physique
Laboratoire de Physique Statistique
24 rue Lhomond
F75231 Paris CEDEX 05
Jean-Pierre.Nadal@lps.ens.fr

Tatjana Nazir
CRNC - CNRS
31, ch. Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
nazir@lnf.cnrs-mrs.fr

Olivier Parodi
CPT
CNRS-Luminy case 907
13288 Marseille CEDEX 9
parodi@cpt.univ-mrs.fr

Hans Ekkehard Plesser
Institut fuer Biologie II
RWTH Aachen
D 52056 Aachen
Germany
plesser@tyto.bio2.rwth-aachen.de

Andrei Popescu-Belis
LIMSI - CNRS
Groupe Langage et Cognition
BP 133
91403 ORSAY Cedex
popescu@limsi.fr

Brigitte Quenet
Laboratoire d'Électronique
ESPCI
10, rue Vauquelin
F 75005 Paris
Brigitte.Quenet@espci.fr

Gilles Renversez
CPT
CNRS-Luminy case 907
13288 Marseille CEDEX 9
renverse@cptsu2.univ-mrs.fr

Arnaud Rey
CRNC - CNRS
31, ch. Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
frog@lnf.cnrs-mrs.fr

Alexa Riehle
CRNC - CNRS
31, ch. Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
ariehle@lnf.cnrs-mrs.fr

Sergi Ripoll
Departament de Fisica
Fonamental
Facultat de Fisica,
Universitat de Barcelona
Av. Diagonal, 647
Barcelona 08028
SPAIN
sripoll@ulysses.ffn.ub.es

Pieter Roelfsema
MPI Brain Research
Deutschordenstrasse 1
D 79104 Freiburg
Allemagne
roelfsema@mpih-frankfurt.mpg.de

Michele Rossignol CPT
CNRS-Luminy case 907
13288 Marseille CEDEX 9
michele@cpt.univ-mrs.fr

Thomas Schanze
Philipps-Universitaet
FB Physik
AG Neuropsychik
Renthof 7
D-35032 Marburg
Th.Schanze@physik.
uni-marburg.de

Sara A. Solla
Deptm.of Physics
Northwestern Univ.
Sheridan Road 21 45
Evanston IL 60208-3112
USA
SOLLA@NWU.EDU

Anne Spalanzani
CLIPS-IMAG
Campus Universite
Joseph Fourier
BP 53
38041 Grenoble Cedex 9
Anne.Spalanzani@imag.fr

Mona Spiridon
Centre MANTRA
Dept. d'Informatique
1015 Lausanne
Suisse
Mona.Spiridon@di.epfl.ch

David Sterratt
Centre for Cognitive Science
University of Edinburgh
2 Buccleuch Place
Edinburgh, EH8 9LW
SCOTLAND, U.K.
David.C.Sterratt@ed.ac.uk

Katrin Suder
Dept. Neurophysiology
(MA 4/149)
Ruhr Universitaet Bochum
Universitaetsstr. 15
D-44780 Bochum
Germany
suder@neurop2.
ruhr-uni-bochum.de

Enric Claverol Tinture
St/ Mare de Deu de Nuria 3 3er 2a
BARCELONA 08017
SPAIN
claverol@eel.upc.es

Jochen Triesch
Institut fuer Neuroinformatik
Ruhr-Universitaet Bochum
Universitaetsstrasse 150
D-44801 Bochum Germany
jochen@neuroinformatik
.ruhr-uni-bochum.de

Antonio Turiel
Departamento de Fisica Teorica
Facultad de Ciencias
Universidad Autonoma de Madrid
28049 MADRID
Spain
amturiel@delta.ft.uam.es

Heather Woodward
Vassar College
124 Raymond Ave.
Poughkeepsie, NY 12604
USA
hewoodward@vaxsar.vassar.edu

CONTENTS

Temporal coding with and without clocks <i>Codage temporel avec et sans horloge</i> R. Lestienne	1
Modeling synfire networks <i>Modélisation des réseaux "Synfire"</i> J. A. Hertz	27
Neuronal decoding of temporal signal <i>Quelles contraintes le fonctionnement des neurones apporte-t-il au codage et au décodage de l'information</i> O. Parodi	47
Algorithms for the detection of connectedness and their neural implementation <i>Algorithmes pour la détection de la connectivité et leur implementation neuronale</i> P. R. Roelfsema, S. Bohte, H. Spekreijse	81
From complex signal to adapted behavior. A theoretical approach of the honeybee olfactory brain <i>Du signal complexe au comportement adapté. Approche théorique du système olfactif de l'abeille</i> B. Quenet, G. Dreyfus, C. Masson	104
Reducing the complexity of neural nets for industrial applications and biological models <i>Réduction de la complexité des réseaux de neurones pour des applications industrielles et pour des modèle biologiques</i> G. Dreyfus	127
Positive regulation circuits and memory <i>Circuits de régulation positifs et mémoire</i> J. Demongeot	148

Sensory coding: information maximization and redundancy reduction	164
<i>Codage sensoriel: maximisation de l'information et réduction des redondances</i>	
J.-P. Nadal, N. Parga	
Learning: a geometrical approach	172
<i>Une approche géométrique de l'apprentissage</i>	
G. Burdet, Ph. Combe, H. Nencka	